

Методы нейрофизиологического мониторинга при операциях на стволе головного мозга: преимущества, ограничения и перспективы развития

Контакты:
Кристина Николаевна
Лаптева
laptevakr@gmail.com

К.Н. Лаптева, А.В. Гаврюшин
ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко»
Минздрава России; Россия, 125047 Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16

Хирургическое лечение опухолей и микромальформаций ствола головного мозга сопряжено с рисками нарастания неврологической симптоматики после операции, что обусловлено высокой концентрацией жизнеобеспечивающих нервных структур в стволе мозга. Для проведения максимально безопасных хирургических вмешательств используют интраоперационный нейрофизиологический мониторинг. На данный момент имеются различные нейрофизиологические модальности – как методики картирования, так и непрерывного мониторинга, которые применяют при нейрохирургических вмешательствах. В статье освещаются возможности применения интраоперационного нейрофизиологического мониторинга во время таких операций на основании данных, представленных в литературе. Работа может быть полезна клиническим нейрофизиологам и нейрохирургам, занимающимся хирургическим лечением пациентов с опухолями и микромальформациями ствола головного мозга.

Ключевые слова: интраоперационный нейрофизиологический мониторинг, опухоль ствола мозга, микромальформация ствола мозга

Для цитирования: Лаптева К.Н., Гаврюшин А.В. Методы нейрофизиологического мониторинга при операциях на стволе головного мозга: преимущества, ограничения и перспективы развития. Нейрохирургия 2025;27(4):114–22.

DOI: <https://doi.org/10.63769/1683-3295-2025-27-4-114-122>

Methods of neurophysiological monitoring during brainstem surgery: advantages, limitations, and future perspectives

K.N. Lapteva, A.V. Gavrjushin

N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery, Ministry of Health of Russia; 16 4th Tverskaya-Yamskaya St., Moscow 125047, Russia

Contacts: Kristina Nikolaevna Lapteva laptevakr@gmail.com

Surgical treatment of tumors and micromalformations in the brainstem carries significant risks of aggravating neurological symptoms post-surgery. This is primarily due to the high concentration of critical nerve structures within the brainstem. To enhance safety during these procedures, intraoperative neurophysiological monitoring is employed. Currently, various neurophysiological modalities, including mapping techniques and continuous monitoring methods, are utilized in these neurosurgical interventions. In this review, we discuss the potential applications of intraoperative neurophysiological monitoring during brainstem surgeries, highlight the limitations of these methods, and explore the prospects for the development of intraoperative diagnostic techniques. This work may be useful for clinical neurophysiologists and neurosurgeons who perform surgical treatment of patients with tumors and micromalformations of the brainstem.

Keywords: intraoperative neurophysiological monitoring, brainstem tumor, brainstem micromalformation

For citation: Lapteva K.N., Gavrjushin A.V. Methods of neurophysiological monitoring during brainstem surgery: advantages, limitations, and future perspectives. Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery 2025;27(4):114–22.

DOI: <https://doi.org/10.63769/1683-3295-2025-27-4-114-122>

ВВЕДЕНИЕ

Хирургическое лечение опухолей и микромальформаций ствола головного мозга стало доступным с конца XX в. благодаря развитию методов нейровизуализационной диагностики и микрохирургической техники, а также определению четких показаний к операции [1, 2]. Внедрение интраоперационного нейрофизиологического мониторинга (ИОНМ) также сыграло важную роль в развитии хирургии ствола головного мозга. Использование этих техник обеспечивает максимальную безопасность операций, что особенно значимо ввиду высокой концентрации жизненно важных нервных структур в этой области мозга [3].

Сегодня в клинической нейрофизиологии широко используют различные методы интраоперационного контроля для снижения риска неврологических осложнений при вмешательствах в структуры ствола мозга. Однако остается неясным, какие из этих методов наиболее актуальны и обладают наибольшей прогностической значимостью, какие следует применять в зависимости от локализации объемного процесса, а также какие существуют ограничения у методов ИОНМ.

Для поиска источников литературы был проведен анализ базы данных MEDLINE с помощью системы PubMed с использованием ключевых фраз и терминов MeSH: *intraoperative neurophysiological monitoring, brainstem surgery*.

Ввиду четких и ограниченных показаний к хирургическому лечению опухолей ствола головного мозга и, как следствие, небольшого количества работ, посвященных применению ИОНМ во время операций, малых и неоднородных групп пациентов, а также наличия различных методик и подходов, проведение систематического анализа затруднено. В связи с этим ответы на поставленные вопросы и анализ источников литературы представлены в формате лекции и частично дополнены нашим видением применения ИОНМ в хирургии ствола головного мозга.

В стволе головного мозга расположены важнейшие нервные центры, включая ядра черепных нервов, связанные с ними кортиконуклеарные тракты, а также двигательные, соматосенсорные и акустические проводящие пути. Поэтому любая применяемая модальность ИОНМ направлена на снижение риска повреждения этих структур во время нейрохирургических вмешательств.

ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ФУНКЦИИ ЧЕРЕПНЫХ НЕРВОВ

Одним из частых осложнений нейрохирургических операций на стволе головного мозга является нарушение функции черепных нервов, что происходит в 40 % случаев [4]. Неврологический дефицит в таких случаях может значительно снизить качество жизни пациентов после операции, привести к косметическим дефектам, ограничить возможность общения, а иногда

потребовать специальных мер для обеспечения защиты верхних дыхательных путей. Поэтому важно гарантировать сохранение функции ядер и корешков черепных нервов при подобных вмешательствах [2, 3].

Методики картирования ядер черепных нервов и их трактов

Картирование ядер черепных нервов (триггерная электромиография (ЭМГ)) является обязательным сопровождением нейрохирургического вмешательства в случае доступа через IV желудочек для идентификации ядер лицевого (VII), языкоглоточного (IX) и подъязычного (XII) нервов. В ряде случаев выбор безопасной зоны резекции ствола без дополнительных методов контроля невозможен по причине деформации ромбовидной ямки и дислокации естественных анатомических ориентиров патологическим процессом [5–7].

Классическая парадигма стимуляции (единичный импульс длительностью 0,2 мс с частотой 1–4 Гц и силой тока до 2–3 мА с использованием биполярного или монополярного стимуляторов) показала высокую эффективность в хирургии ствола мозга и используется рутинно уже более 30 лет. Показатели воспроизведимости (положительные пробы при стимуляции в начале удаления опухоли) для ядер лицевого и каудальной группы черепных нервов достигают достаточно высоких значений – от 70 до 100 % [5–8]. Наличие неврологического дефицита до операции со стороны исследуемого ядра, а также сложная визуализация дна IV желудочка из-за доступа и деформации ствола мозга объемным образованием могут существенно затруднить идентификацию ядер [6]. Кроме того, индивидуальные особенности расположения ядер, гетерогенная структура нервной ткани, физические параметры во время стимуляции (температура, соотношение крови и ликвора, используемые в операционной растворы и др.), а также пороги возбудимости, отличающиеся для каждого ядра, могут создавать технические трудности при картировании [9, 10]. Тем не менее, как правило, предоперационное картирование обеспечивает хирурга анатомо-физиологическими сведениями, необходимыми для определения безопасных зон резекции ствола. В случаях, когда стандартные параметры картирования оказываются недостаточными для регистрации M-ответов, возможна модификация парадигмы стимуляции. Так, в литературе представлена методика комбинации единичного импульса и пачки стимулов с одинаковыми параметрами для увеличения плотности заряда [11].

Модальность триггерной ЭМГ продемонстрировала свою значимость преимущественно как инструмент идентификации. Интраоперационное картирование, проводимое после основного этапа операции, характеризуется низкой чувствительностью (до 20 %), что ограничивает его возможности в прогнозировании развития неврологического дефицита. При этом специфичность

метода достаточно высока – 85,7 %. Таким образом, использование только этих данных затрудняет оценку функционального состояния ядер черепных нервов [3, 6]. Отчетливый ответ может быть получен от корешка нерва уже при поврежденном ядре, либо развивающиеся нарушения могут быть связаны с повреждением афферентных путей кортиконуклеарных трактов [6, 12].

При локализации процесса в покрышке среднего мозга или моста требуется стимуляция ядер глазодвигательного (III) и отводящего (VI) нервов. Эти ядра расположены глубже, чем, например, ядра лицевого нерва, что усложняет их картирование [7]. Кроме того, глазодвигательные мышцы имеют малое количество фибрилл, иннервируемых отдельными аксонами, что может привести к отсутствию четких М-ответов при их стимуляции. Аналогичные проблемы возникают при стимуляции корешка тройничного нерва (V) при доступах с вентролатеральной стороны ствола из-за смешанной анатомической структуры тройничного нерва и меньшего количества моторных волокон [13].

Таким образом, единой парадигмы стимуляции для всех моторных и смешанных черепных нервов может быть недостаточно, требуются модификации интенсивности стимула и методики подачи импульса. Перспективы развития триггерной ЭМГ в хирургии ствола мозга, на наш взгляд, заключаются в разработке протоколов стимуляции, которые помогут не только локализовать ядро черепного нерва, но и уточнить соотношения кортиконуклеарных трактов и объемного образования во время операции. Внедрение экспериментальных данных с визуализацией кортиконуклеарных трактов на диффузионно-тензорных магнитно-резонансных (МР) изображениях и использование персонализированных протоколов могут упростить планирование доступов и идентификацию трактов [14].

Комбинация прямой стимуляции и спонтанной ЭМГ еще более способствует снижению риска повреждения ядер и корешков черепных нервов во время операции. Нейротонические ирритации регистрируются на спонтанной ЭМГ в виде «спайков», «вспышек» и «нерегулярных пачек». Появление «вспышек» может свидетельствовать о вовлечении нерва в ходе манипуляций, а устойчивая регистрация «пачек» потенциально указывает на вероятность развития неврологического дефицита, хотя и характеризуется невысокой чувствительностью (22–55 %) и высокой специфичностью (78–92 %) [15, 16]. При усиении нейротонических реакций со стороны черепных нервов рекомендуется более осторожно проводить манипуляции в данной области, кроме того, целесообразна своевременная идентификация ядер, поскольку они могут располагаться в непосредственной близости [16, 17].

Кортиконуклеарные моторные вызванные потенциалы

После идентификации ядер черепных нервов и определения их вовлечения во время основного этапа

хирургии необходима достоверная информация об их функциональном статусе. С одной стороны, возникающие нарушения со стороны ядер черепных нервов можно предотвратить, сделав манипуляции менее агрессивными. С другой стороны, диагностика уже возникших нарушений помогает спланировать адекватную тактику ведения пациента в раннем послеоперационном периоде. Например, если говорить о каудальной группе нервов, то правильно выбранные способы протекции верхних дыхательных путей (продленная искусственная вентиляция легких, кормление через назогастральный зонд, проведение трахеостомии) помогают избежать аспирации и присоединения пневмонии в раннем послеоперационном периоде.

Метод кортиконуклеарных моторных вызванных потенциалов (КН-МВП) может применяться для определения функционального статуса со стороны лицевого (VII), подъязычного (IX), языкоглоточного (XII), блуждающего (X) нервов. Методика основана на стимуляции моторной зоны электрическим током и регистрации потенциалов от целевых мышц. Модальность показала высокую прогностическую значимость для определения функционального статуса со стороны лицевого нерва в хирургии экстракраниальных объемных образований. В работе С.С. Dong и соавт. значения чувствительности и специфичности метода составили 100 и 88 % соответственно [18]. У данного метода существуют некоторые технические ограничения, связанные с получением исходных устойчивых и хорошо воспроизводимых ответов, что связано с достаточно близким расположением стимулирующих и регистрирующих электродов [19]. Показатели воспроизводимости методики для каудальной группы черепных нервов составляют от 90 до 100 % [20, 21] и несколько ниже при мониторинге функции лицевого нерва – 83–95 % [18, 19, 22]. В настоящее время стандартная методология предполагает подачу электрического стимула с помощью винтовых электродов, установленных в проекции моторной зоны (C3, C4, Cz). Стимул состоит из пачки 4–5 импульсов длительностью 50–500 мкс, при этом интенсивность варьирует в зависимости от длительности импульса и может достигать 550 В (для импульсов длительностью 50 мкс). Межимпульсный интервал составляет 2 мс. Для исключения активации периферической части кортиконуклеарного тракта через 40–90 мс после основной пачки импульсов подают единичный импульс [19–21]. Регистрация ответов возможна с помощью игольчатых электродов, установленных в исследуемые мышцы (круговая мышца глаза, круговая мышца рта – лицевой нерв; мягкое небо – языкоглоточный нерв; корень языка – подъязычный нерв) [20], или с использованием интубационной трубки с электродами [21, 23]. Однако при таком способе регистрации ответов чувствительность методики значительно снижается – до 66 %, поскольку возрастает риск регистрации потенциала дальнего

поля [21, 23]. В качестве прогностически значимого снижения, как правило, рассматривают уменьшение амплитуды на 50 % от базового уровня, основываясь на принципах, применяемых к стандартным транскраниальным моторным вызванным потенциалам (ТК-МВП) [21, 23]. Для оценки динамики ответов также может использоваться так называемый «метод порога»: увеличение необходимой интенсивности стимула более чем на 100 мА является предиктором нарастания неврологической симптоматики [22]. Растущее число публикаций, посвященных методу КН-МВП, говорит о высокой значимости этого метода и возможности его применения и в хирургии объемных образований ствола головного мозга [20, 24].

Мониторинг рефлексов

Несмотря на высокую прогностическую значимость метода КН-МВП, на основании результатов этого метода невозможно в полной мере прогнозировать нарастание определенной неврологической симптоматики. Например, глотание, жевание, регуляция дыхания обеспечивают не только моторные корешки, но и сенсорные рефлекторные пути. Ни прямая стимуляция, ни метод КН-МВП не могут обеспечить контроль интрамедуллярных афферентных корешков или интрануклеарных трактов.

В арсенале ИОНМ существует ряд методик для мониторинга стволовых рефлексов [25]. Однако такие методики в хирургии ствола мозга в настоящее время не используют как основные, в литературе их практическое применение рассмотрено в основном при удалении неврином мостомозжечкового угла, а также при хирургических вмешательствах на щитовидной железе [25–27].

В литературе показана возможность мониторинга аддукторного рефлекса гортани (laryngeal adductor reflex) для прогноза симптоматики со стороны каудальной группы черепных нервов [28, 29]. Поэтому данная методология также может применяться и в хирургии ствола мозга при локализации объемного образования в его каудальных отделах. Метод устойчив к анестезии, не вызывает двигательных реакций пациента при стимуляции, неинвазивен и прост в применении [29]. Данный рефлекс является защитным механизмом верхних дыхательных путей за счет действия приводящих мышц гортани и двустороннего смыкания голосовых связок. Поэтому суть техники заключается в подаче единичных импульсов на слизистую оболочку гортани с поверхностных электродов, совмещенных с интубационной трубкой, с одной стороны и регистрации ответов – с другой стороны. Рекомендуют использовать следующие параметры: длительность импульса – 0,1–1 мс, интенсивность импульса – 3–15 мА, при необходимости возможно усреднять ответы [29]. По данным литературы, воспроизводимость ответов может достигать 94–100 %. Ограничения данной ме-

тодики – возможная дислокация интубационной трубки, вероятность регистрации потенциала дальнего поля и, соответственно, появления недостоверных результатов, так как стимулирующие и регистрирующие электроды находятся на голосовых связках, а не в них. По данным литературы, при снижении амплитуды ответов более чем на 50–60 % чувствительность и специфичность методики составляют 60–85 и 99,2–100 % соответственно [28, 29]. Таким образом, при получении устойчивых рефлексов во время операции появляется возможность оценивать и сенсорные, и моторные проводящие пути, участвующие в процессе глотания.

В качестве дополнительного метода контроля функции подъязычного нерва (XII) может быть использован тригемино-подъязычный рефлекс (trigeminal hypoglossal reflex), который опосредован афферентными корешками тройничного нерва и эфферентными путями подъязычного нерва, координирующими движения языка при осуществлении оромоторных функций (вдох, глотание, вокализация, жевание и т. д.). Соответственно, этот рефлекс может быть использован как дополнительный метод контроля совместно с методикой КН-МВП [30, 31]. Стимуляцию осуществляют с использованием игольчатых электродов, установленных под кожно под скапулой дугой и на 0,5 см кпереди от височно-нижнечелюстного сустава. Подают пачки импульсов по 2–4 импульса с частотой 0,4–0,7 Гц, длительностью импульса 0,2–0,5 мс и межимпульсным интервалом 2 мс. Регистрацию ответов проводят с мышц языка (шилоглоточная и подбородочно-язычная мышцы). На данный момент в литературе нет данных о прогностической значимости метода, но описаны технические особенности методологии с невысокой воспроизводимостью ответов – 82,1 % [32].

Применение стволовых рефлексов, таких как мигательный рефлекс и Н-рефлекс жевательной мышцы, в хирургическом лечении внутристволовых поражений пока не широко освещено в литературе. В работе E.I. Aydinlar и соавт. описаны возможности применения мигательного рефлекса в хирургии задней черепной ямки [33], более подробно данная методология рассмотрена для целей контроля функции лицевого нерва в хирургии мостомозжечкового угла и при выполнении микроваскулярной декомпрессии [26, 27, 30]. Воспроизводимость метода не достигает максимальных значений и составляет 80–93 %, а снижение ответа на 50 % от базового является неблагоприятным прогностическим признаком. Чувствительность и специфичность в прогнозировании краткосрочных исходов составляют 75–88 и 83–100 % соответственно [26, 27, 33]. Методика не получила широкого применения в хирургии ствола головного мозга, вероятно из-за методологических трудностей при регистрации рефлексов, невысокой воспроизводимости ответов

и физиологической природы рефлексов [34]. Для стимуляции используют игольчатые электроды, установленные подкожно в проекции выхода надглазничного нерва, с подачей пачек из 1–7 импульсов с частотой 0,4 Гц, длительностью 0,3–0,5 мс и интервалом 2 мс. Интенсивность стимуляции выбирают в пределах 20–40 В, возможно использование двойного трейна для увеличения мощности стимула. Ответы регистрируют с ипсолатеральной круговой мышцы глаза. Мигательный рефлекс, зарегистрированный у пациента вне седации, состоит из 2 компонентов – R1 и R2. Компонент R1 отражает периферическую проводимость по тройничному и лицевому нервам, в то время как R2 связан с прохождением импульса через тригеминальный комплекс на уровне моста, включая спинальное ядро тройничного нерва и ядро лицевого нерва. Изменения параметров R2 указывают на повреждения в этой области ствола. В условиях седации можно зарегистрировать только компонент R1, а компонент R2 – трудно или практически невозможно, что ограничивает возможности диагностики внутристволовых повреждений [34]. Таким образом, методика может быть полезной как дополнительный метод контроля функции тройничного и лицевого нервов, компенсируя недостатки метода КН-МВП для лицевого нерва. Она также может применяться при доступах к вентролатеральной поверхности ствола мозга, когда существует вероятность повреждения корешков черепных нервов, с анализом количественных показателей стабильного компонента R1.

Аналогичные трудности в оценке функции ядра тройничного нерва возникают при регистрации Н-рефлекса жевательной мышцы. Стимулирующие игольчатые электроды размещают под скуловой дугой, а регистрирующие – в передней и нижней части брюшка жевательной мышцы и передней части височной. Подают одиночный импульс длительностью 0,2 мс, интенсивность которого постепенно увеличивают до появления Н-рефлекса, а затем до М-ответа. В состоянии седации регистрация рефлекса затруднена, а воспроизводимость не превышает 70 %, поскольку необходимо легкое напряжение жевательной мышцы, что в операционной можно обеспечить только с помощью распорки между зубами, удерживающей челюсть в полуоткрытом положении [25, 35]. В литературе на данный момент не представлены работы, показывающие прогностическую значимость данной методики. На наш взгляд, ее внедрение в хирургию ствола мозга может быть оправдано, так как существует анатомическая сложность в регистрации КН-МВП от мышц, иннервируемых тройничным нервом. Эта методика может стать незаменимой для контроля функции ядра тройничного нерва при опухолях моста, поскольку рефлекс является моносинаптическим и отражает проводимость через средний мозг и мост, позволяя оценивать как сенсорную, так и моторную функции ядра тройничного нерва [35].

Таким образом, методы картирования и мониторинга ядер черепных нервов и их трактов разнообразны, каждый имеет свои цели и ограничения. Наибольшую прогностическую ценность представляет методика КН-МВП, однако для комплексной оценки функции ядер и корешков черепных нервов и обеспечения максимальной безопасности необходима комбинация методов.

МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА И КАРТИРОВАНИЯ КОРТИКОСПИНАЛЬНОГО ТРАКТА

Появление пирамидной недостаточности также ухудшает качество жизни пациентов после операции и может привести к инвалидизации. При локализации процесса в ножке мозга и базисе ствола методики ИОНМ используют как для картирования двигательного пути, так и для мониторинга его функции. Картирование кортикоспинального тракта позволяет определить его расположение относительно объемного образования, а точность идентификации кортикоспинального тракта повышается при сопоставлении дооперационной МР-трактографии и диффузионно-взвешенных изображений [36]. Непрерывный мониторинг ТК-МВП помогает своевременно диагностировать повреждения трактов во время операции [37]. Методы картирования и мониторинга проводящих путей, успешно применяемые в супратенториальной хирургии, также эффективно внедрены в хирургию ствола мозга, используются с аналогичными параметрами стимуляции, не требуют особых условий проведения и не имеют существенных ограничений [38]. Воспроизведимость ТК-МВП может достигать 100 %, ограничением становится только выраженный неврологический дефицит [39]. Прогностически неблагоприятными являются снижение амплитуды ответов на 50 % [39, 40] или увеличение порога стимуляции, например на 20 мА [41]. Низкая чувствительность и специфичность в прогнозировании пирамидной недостаточности (31–54 и 75–100 % соответственно) могут быть связаны с положением «сидя» на операционном столе и разнородной группой участников в исследовании пациентов по возрасту, локализацией и размерами опухолей (объемные образования ствола, мостомозжечкового угла, IV желудочка) [39, 40, 42]. Тенденции к проведению таких оперативных вмешательств в положении лежа на животе, а также нивелирование эффекта “brain shift”, связанного со снижением амплитуды ТК-МВП из-за западения вещества мозга (опухоли и микромальформации именно внутристволовой локализации имеют небольшие размеры по сравнению с другими объемными образованиями), дают возможность более точного прогнозирования пирамидной недостаточности: по данным ряда авторов, чувствительность и специфичность могут достигать достаточно высоких значений – 87,5–100 и 75–100 % соответственно [9, 41, 43, 44].

МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА И КАРТИРОВАНИЯ СОМАТОСЕНСОРНОГО ТРАКТА

Необходимость мониторинга соматосенсорных вызванных потенциалов (ССВП) связана с рисками повреждения медиальной петли и развитием проприоцептивных дефицитов. Методика периферических ССВП включает стимуляцию срединного и большеберцового нервов в области запястья и голеностопного сустава с регистрацией ответов на скальпе в проекции сенсорных областей рук и ног, применяется при локализации процесса вблизи спиноталамического тракта [45]. Несмотря на высокую потребность в использовании методики контроля соматосенсорного тракта при таких операциях, у данного метода существуют недостатки, например воспроизводимость ответов не достигает максимальных значений [46]. Причинами могут быть исходные чувствительные нарушения до операции и используемые средства для анестезии. Как и в случае методики ТК-МВП, в литературе существуют разногласия в вопросе о прогностической значимости методики ССВП. Чувствительность методики варьирует от низких значений (20–29 %) [39, 47] до высоких (80–90 %) [42, 43, 48]. Ограничения могут быть связаны с положением пациента на столе, скоплением воздуха в субдуральном пространстве и послеоперационным отеком [39, 47]. Изменения параметров ССВП неспецифичны, могут быть обусловлены как возникающими ишемическими нарушениями, так и прямым повреждением медиальной петли, что более вероятно при таких операциях [49]. Редукция амплитуды на 50 % и увеличение латентности на 10 % регистрируются только при снижении кровотока до 14 мл крови на 100 г ткани мозга в минуту и менее, т. е. изменения нейрофизиологических сигналов возникают отдаленно [48, 50]. Временной интервал прямого повреждения соматосенсорных трактов сложно точно зафиксировать во время операции, однако в случае изменений сигналов ССВП они коррелируют с проводимыми манипуляциями в области медиальной петли и возникают достаточно быстро. В некоторых работах снижение амплитуды ССВП у конкретных пациентов отмечалось во время основного этапа при удалении опухолей продолговатого мозга [47, 51]. Перспективой данного направления является разработка методик контроля соматосенсорных трактов с более высокой прогностической значимостью и воспроизводимостью ответов. К ним относятся методики регистрации соматосенсорных ответов, включая непосредственную стимуляцию ствола в проекции медиальной петли [49].

МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА АКУСТИЧЕСКИХ ПРОВОДЯЩИХ ПУТЕЙ

Методика акустических стволовых вызванных потенциалов (АСВП) была первой доступной методикой при хирургии ствола мозга [52]. Ее использовали для контроля слуховых путей и диагностики возника-

ющих ишемических нарушений. Снижение амплитуды 5-го пика более чем на 50 % и/или увеличение латентности более чем на 1 мс считают неблагоприятным признаком [17]. Несмотря на сопоставимые с другими методиками ИОНМ показатели чувствительности и специфичности (43–90 и 70–97 % соответственно), методика применяется преимущественно для сохранения слуха при хирургии неврином слухового нерва и микроваскулярных декомпрессиях [53, 54]. В хирургии стволовых образований целесообразность применения АСВП ограничена, так как неврологический дефицит со стороны слуховых путей является редким осложнением (до 7 %) [55]. Локальная хирургическая травма не всегда затрагивает слуховые пути в стволе мозга, а диагностика ишемических нарушений возможна только при выраженных изменениях, поскольку эти пути более резистентны к ишемии. Чувствительность методики к анестезии, ее неоднозначная прогностическая значимость, а также неспецифичность изменений параметров АСВП ограничивают ее эффективность в хирургии ствола мозга [47, 56]. Рутинное использование АСВП описано в работах с датами публикации до 2010–2011 гг. [57].

ВЫБОР МОДАЛЬНОСТИ ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЪЕМНОГО ПРОЦЕССА

Очевидно, что выбор методов ИОНМ или их комбинации основывается на анатомической близости зоны хирургического вмешательства к нервным структурам и проводящим путям ствола мозга (рис. 1).

При локализации процесса в покрышке среднего мозга используют комбинацию метода ССВП и прямой стимуляции ядер глазодвигательного (III) нерва [3, 17].

При поражении ножки мозга или базиса моста достаточно выполнения мониторинга ТК-МВП и картирования кортикоспинального тракта. В случае поражения покрышки моста спектр необходимых методик становится более широким и включает мониторинг ССВП, прямую стимуляцию ядер тройничного (V), отводящего (VI) и лицевого (VII) нервов, мониторинг КН-МВП от мышц, иннервируемых лицевым нервом, а также при возможности мониторинг мигательного рефлекса и Н-рефлекса жевательной мышцы [3, 17].

Хирургическое вмешательство в области продолговатого мозга должно сопровождаться мониторингом ССВП и ТК-МВП, прямой стимуляцией ядер каудальной группы черепных нервов (IX, X, XII) и мониторингом КН-МВП, а также мониторингом аддукторного рефлекса гортани [3, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время возможности ИОНМ в нейрохирургии ствола мозга достаточно обширны. Наиболее значимые нейрофизиологические методики можно

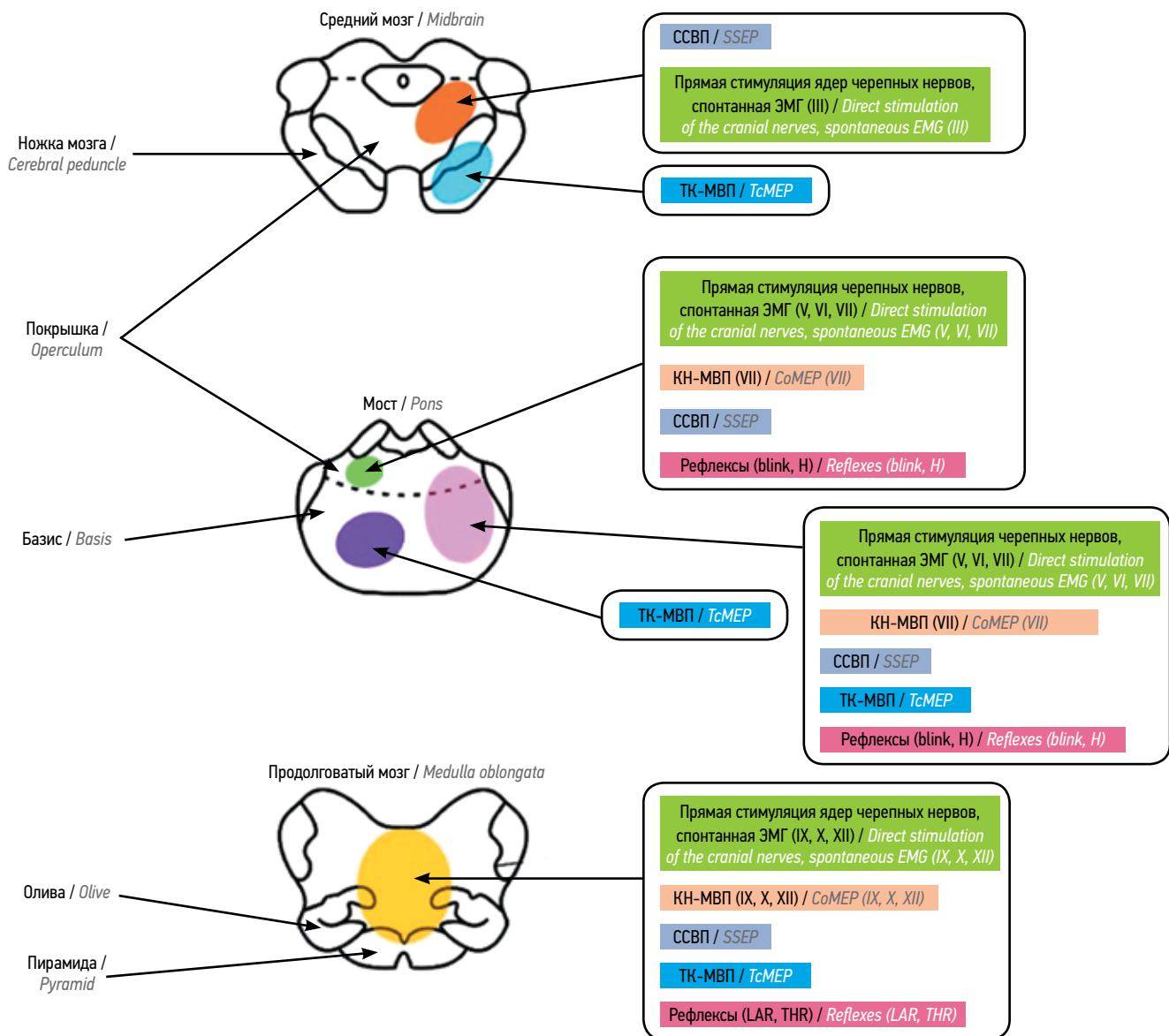


Рис. 1. Выбор модальности интраоперационного нейрофизиологического мониторинга и комбинаций методов мониторинга во время хирургического лечения в зависимости от уровня поражения ствола мозга. ЭМГ – электромиография; ССВП – соматосенсорные вызванные потенциалы; ТК-МВП – транскраниальные моторные вызванные потенциалы; КН-МВП – кортиконуклеарные моторные вызванные потенциалы. LAR – аддукторный рефлекс гортани; blink – мигательный рефлекс; THR – тригемино-подъязычный рефлекс; H – H-рефлекс жевательной мышцы

Fig. 1. Selection of intraoperative neurophysiological monitoring modality and combinations of monitoring techniques during surgical treatment depending on the severity of brainstem damage. EMG – electromyography; SSEP – somatosensory evoked potentials; TcMEP – transcranial motor evoked potentials; CoMEP – corticobulbar motor evoked potentials. LAR – laryngeal adductor reflex; blink – blinking reflex; THR – trigeminal hypoglossal reflex; H – H-reflex of the masseter muscle

разделить на несколько основных аспектов: картирование ядер и корешков черепных нервов и непрерывный мониторинг их функционального статуса; мониторинг и картирование афферентных и эффеरентных проводящих путей ствола мозга. Во время проведения исследования и интерпретации результатов могут возникать технические трудности и неоднозначные ситуации, кроме того, все доступные модальности не обладают максимальными значениями чувствительности и специфичности. Для повышения качества и прогностической значимости ИОНМ в целом при хирургиче-

ском лечении объемных образований ствола головного мозга необходимо комбинировать доступные методики. Перспективами развития модальностей ИОНМ, применяемых в хирургическом лечении опухолей и микромальформаций ствола головного мозга, на наш взгляд, являются разработка индивидуальных протоколов проведения исследования на основании данных о локализации объемного процесса согласно МР-изображениям, а также усовершенствование методологии и используемого инструментария при проведении уже доступных и внедренных методик.

Литература | References

1. Bricolo A., Turazzi S. Surgery for gliomas and other mass lesions of the brainstem. *Adv Tech Stand Neurosurg* 1995;22:261–341. DOI: 10.1007/978-3-7091-6898-1_5
2. Faulkner H., Arnaout O., Hoshide R. et al. The surgical resection of brainstem glioma: outcomes and prognostic factors. *World Neurosurg* 2021;146:e639–e50. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.10.147
3. Morota N., Deletis V. Brainstem surgery: functional surgical anatomy with the use of an advanced modern intraoperative neurophysiological procedure. *Adv Tech Stand Neurosurg* 2023;48:21–55. DOI: 10.1007/978-3-031-36785-4_2
4. Bharati S.J., Pandia M.P., Rath G.P. et al. Perioperative problems in patients with brainstem tumors and their influence on patient outcome. *J Anaesthesiol Clin Pharmacol* 2016;32(2):172–6. DOI: 10.4103/0970-9185.182102
5. Strauss C., Romstöck J., Nimsky C. et al. Intraoperative identification of motor areas of the rhomboid fossa using direct stimulation. *J Neurosurg* 1993;79(3):393–9. DOI: 10.3171/jns.1993.79.3.0393
6. Morota N., Deletis V., Epstein F. et al. Brain stem mapping: neurophysiological localization of motor nuclei on the floor of the fourth ventricle. *Neurosurgery* 1995;37(5):922–9; discussion 929–30. DOI: 10.1227/00006123-199511000-00011
7. Eisner W., Schmid U.D., Reulen H.J. et al. The mapping and continuous monitoring of the intrinsic motor nuclei during brain stem surgery. *Neurosurgery* 1995;37(2):255–65. DOI: 10.1227/00006123-199508000-00010
8. Katsuta T., Morioka T., Fujii K., Fukui M. Physiological localization of the facial colliculus during direct surgery on an intrinsic brain stem lesion. *Neurosurgery* 1993;32(5):861–3. DOI: 10.1227/00006123-199305000-00025
9. Slotty P.J., Abdulazim A., Kodama K. et al. Intraoperative neurophysiological monitoring during resection of infratentorial lesions: the surgeon's view. *J Neurosurg* 2017;126(1):281–8. DOI: 10.3171/2015.11.JNS15991
10. Bertalanffy H., Tissira N., Krayenbühl N. et al. Inter- and intrapatient variability of facial nerve response areas in the floor of the fourth ventricle. *Neurosurgery* 2011;68(1 Suppl Operative): 23–31; discussion 31. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31820781fb
11. Fava E., Colistra D., Fragale M., Cenzato M. A novel method of neurophysiological brainstem mapping in neurosurgery. *J Neurosci Methods* 2024;405:110096. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2024.110096
12. Karakis I. Brainstem mapping. *J Clin Neurophysiol* 2013;30(6):597–603. DOI: 10.1097/01.wnp.0000436892.39727.5b
13. Catapano J.S., Rumalla K., Srinivasan V.M. et al. A taxonomy for brainstem cavernous malformations: subtypes of pontine lesions. Part 1: basilar, peritrigeminal, and middle peduncular. *J Neurosurg* 2022;137(5):1462–76. DOI: 10.3171/2022.1.JNS212690
14. Jenabi M., Peck K.K., Young R.J. et al. Identification of the corticobulbar tracts of the tongue and face using deterministic and probabilistic DTI fiber tracking in patients with brain tumor. *AJNR Am J Neuroradiol* 2015;36(11):2036–41. DOI: 10.3174/ajnr.A4430
15. Schlake H.P., Goldbrunner R.H., Milewski C. et al. Intra-operative electromyographic monitoring of the lower cranial motor nerves (LCN IX–XII) in skull base surgery. *Clin Neurol Neurosurg* 2001;103(2):72–82. DOI: 10.1016/s0303-8467(01)00115-9
16. Grabb P.A., Albright A.L., Scelabassi R.J., Pollack I.F. Continuous intraoperative electromyographic monitoring of cranial nerves during resection of fourth ventricular tumors in children. *J Neurosurg* 1997;86(1):1–4. DOI: 10.3171/jns.1997.86.1.0001
17. Sala F., D'Amico A. Intraoperative neurophysiological monitoring during brainstem surgery. In: *Brainstem tumors*. Ed. by G. Jallo, M. Noureldine, N. Shimony. Switzerland: Springer, 2020. Pp. 109–130. DOI: 10.1007/978-3-030-38774-7_5
18. Dong C.C., Macdonald D.B., Akagami R. et al. Intraoperative facial motor evoked potential monitoring with transcranial electrical stimulation during skull base surgery. *Clin Neurophysiol* 2005;116(3):588–96. DOI: 10.1016/j.clinph.2004.09.013
19. Matthies C., Raslan F., Schweitzer T. et al. Facial motor evoked potentials in cerebellopontine angle surgery: technique, pitfalls and predictive value. *Clin Neurol Neurosurg* 2011;113(10):872–9. DOI: 10.1016/j.clineuro.2011.06.011
20. Kullmann M., Tatagiba M., Liebsch M., Feigl G.C. Evaluation of the predictive value of intraoperative changes in motor-evoked potentials of caudal cranial nerves for the postoperative functional outcome. *World Neurosurg* 2016;95:329–34. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.07.078
21. Fukuda M., Takao T., Hiraishi T. et al. Pharyngeal motor evoked potential monitoring during skull base surgery predicts postoperative recovery from swallowing dysfunction. *World Neurosurg* 2015;84(2):555–60. DOI: 10.1016/j.wneu.2015.04.023
22. Goto T., Muraoka H., Kodama K. et al. Intraoperative monitoring of motor evoked potential for the facial nerve using a cranial peg-screw electrode and a “threshold-level” stimulation method. *Skull Base* 2010;20(6):429–34. DOI: 10.1055/s-0030-1261270
23. Ito E., Ichikawa M., Itakura T. et al. Motor evoked potential monitoring of the vagus nerve with transcranial electrical stimulation during skull base surgeries. *J Neurosurg* 2013;118(1):195–201. DOI: 10.3171/2012.10.JNS12383
24. Fernández-Conejero I., Ulkatan S., Sen C. et al. Intraoperative monitoring of facial corticobulbar motor evoked potentials: methodological improvement and analysis of 100 patients. *Clin Neurophysiol* 2022;142:228–35. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.08.006
25. Choi J., Díaz-Baamonde A., Sánchez Roldán M.L. et al. Advancing intraoperative neurophysiological monitoring with human reflexes. *J Clin Neurol* 2024;20(2):119–30. DOI: 10.3988/jcn.2023.0416
26. Fernández-Conejero I., Ulkatan S., Sen C., Deletis V. Intraoperative neurophysiology during microvascular decompression for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol* 2012;123(1):78–83. DOI: 10.1016/j.clinph.2011.10.007
27. Liu J., Fan X., Yang L. et al. Predictive value of Blink reflex and facial corticobulbar motor evoked potential in cerebellopontine angle tumor surgery. *Clin Neurophysiol* 2024;162:165–73. DOI: 10.1016/j.clinph.2024.03.033
28. Téllez M.J., Mirallave-Pescador A., Seidel K. et al. Neurophysiological monitoring of the laryngeal adductor reflex during cerebellar-pontine angle and brainstem surgery. *Clin Neurophysiol* 2021;132(2):622–31. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.10.021
29. Sinclair C.F., Téllez M.J., Ulkatan S. Noninvasive, tube-based, continuous vagal nerve monitoring using the laryngeal adductor reflex: feasibility study of 134 nerves at risk. *Head Neck* 2018;40(11):2498–506. DOI: 10.1002/hed.25377
30. Choi J., Yang S., Kim J.S. et al. Predictive value of intraoperative blink reflex monitoring for surgical outcome during microvascular decompression for hemifacial spasm. *Clin Neurophysiol* 2020;131(9):2268–75. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.06.025
31. Szelenyi A., Fava E. Long latency responses in tongue muscle elicited by various stimulation sites in anesthetized humans – new insights into tongue-related brainstem reflexes. *Brain Stimul* 2022;15(3):566–75. DOI: 10.1016/j.brs.2022.03.003
32. Mirallave Pescador A., Téllez M.J., Sánchez Roldán M.L. et al. Methodology for eliciting the brainstem trigeminal-hypoglossal reflex in humans under general anesthesia. *Clin Neurophysiol* 2022;137:1–10. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.02.004
33. Aydinlar E.I., Kocak M., Soykam H.O. et al. Intraoperative neuromonitoring of blink reflex during posterior fossa surgeries and its correlation with clinical outcome. *J Clin Neurophysiol* 2022;39(4):299–306. DOI: 10.1097/WNP.0000000000000777
34. Deletis V., Urriza J., Ulkatan S. et al. The feasibility of recording blink reflexes under general anesthesia. *Muscle Nerve* 2009;39(5):642–6. DOI: 10.1002/mus.21257

35. Ulkatan S., Jaramillo A.M., Téllez M.J. et al. Feasibility of eliciting the H reflex in the masseter muscle in patients under general anesthesia. *Clin Neurophysiol* 2017;128(1):123–7.
DOI: 10.1016/j.clinph.2016.10.092
36. Rogalska M., Antkowiak L., Mandera M. Clinical application of diffusion tensor imaging and fiber tractography in the management of brainstem cavernous malformations: a systematic review. *Neurosurg Rev* 2022;45(3):2027–40.
DOI: 10.1007/s10143-022-01759-7
37. Yang Y., Neidert M.C., Vélez J. et al. Mapping and monitoring of the corticospinal tract by direct brainstem stimulation. *Neurosurgery* 2022;91(3):496–504. DOI: 10.1227/neu.0000000000002065
38. Дмитриев А.Ю., Синкин М.В., Дашиян В.Г. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг в хирургии опухолей головного мозга супратенториальной локализации. Часть 1. Исследование двигательной проводимости. *Нейрохирургия* 2022;24(2):105–12. DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-2-105-112
Dmitriev A.Yu., Sinkin M.V., Dashyan V.G. Intraoperative neuromonitoring in surgery of supratentorial brain tumors. Part 1. Assessment of motor conductivity. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2022;24(2):105–12. (In Russ.).
DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-2-105-112
39. Shiban E., Zerr M., Huber T. et al. Poor diagnostic accuracy of transcranial motor and somatosensory evoked potential monitoring during brainstem cavernoma resection. *Acta Neurochir (Wien)* 2015;157(11):1963–9; discussion 1969. DOI: 10.1007/s00701-015-2573-7
40. Neuloh G., Bogucki J., Schramm J. Intraoperative preservation of corticospinal function in the brainstem. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2009;80(4):417–22. DOI: 10.1136/jnnp.2008.157792
41. Sarnthein J., Bozinov O., Melone A.G. et al. Motor-evoked potentials (MEP) during brainstem surgery to preserve corticospinal function. *Acta Neurochir (Wien)* 2011;153(9):1753–9.
DOI: 10.1007/s00701-011-1065-7
42. Rauschenbach L., Santos A.N., Dinger T.F. et al. Predictive value of intraoperative neuromonitoring in brainstem cavernous malformation surgery. *World Neurosurg* 2021;156:e359–e73.
DOI: 10.1016/j.wneu.2021.09.064
43. Kodama K., Javadi M., Seifert V., Szelényi A. Conjunct SEP and MEP monitoring in resection of infratentorial lesions: lessons learned in a cohort of 210 patients. *J Neurosurg* 2014;121(6):1453–61. DOI: 10.3171/2014.7.JNS131821
44. Gläsker S., Pechstein U., Vougioukas V.I., Van Velthoven V. Monitoring motor function during resection of tumours in the lower brain stem and fourth ventricle. *Childs Nerv Syst* 2006;22(10):1288–95. DOI: 10.1007/s00381-006-0101-z
45. Toleikis J.R., Pace C., Jahangiri F.R. et al. Intraoperative somatosensory evoked potential (SEP) monitoring: an updated position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. *J Clin Monit Comput* 2024;38(5):1003–42.
DOI: 10.1007/s10877-024-01201-x
46. Kombos T., Suess O., Da Silva C. et al. Impact of somatosensory evoked potential monitoring on cervical surgery. *J Clin Neurophysiol* 2003;20(2):122–8.
DOI: 10.1097/00004691-200304000-00006
47. Щекутьев Г.А., Лубнин А.Ю., Баркалай Д.Е. и др. Мониторинг коротколатентных вызванных потенциалов во время операций на стволе головного мозга. *Анестезиология и реаниматология* 1994;5:48–52.
Shechut'ev G.A., Lubnin A.Yu., Barkalaya D.E. et al. Monitoring of short latent evoked potentials during brain stem surgery. *Anestesiologiya i reanimatologiya = Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology* 1994;5:48–52. (In Russ.).
48. Thirumala P.D., Kassasm A.B., Habeych M. et al. Somatosensory evoked potential monitoring during endoscopic endonasal approach to skull base surgery: analysis of observed changes. *Neurosurgery* 2011;69(1 Suppl Operative):ons64–76; discussion ons76.
DOI: 10.1227/NEU.0b013e31821606e4
49. Le S., Nguyen V., Lee L. et al. Direct brainstem somatosensory evoked potentials for cavernous malformations. *J Neurosurg* 2021;137(1):156–62. DOI: 10.3171/2021.7.JNS21317
50. Lopez J.R. Intraoperative neurophysiological monitoring. *Int Anesthesiol Clin* 1996;34(4):33–54.
DOI: 10.1097/00004311-199603440-00005
51. Takasato Y., Arai T., Ohta Y., Yamada K. Gross total removal of adult brainstem glioma – two case reports. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 1993;33(9):625–9. DOI: 10.2176/nmc.33.625
52. Raudzens P.A., Shetter A.G. Intraoperative monitoring of brainstem auditory evoked potentials. *J Neurosurg* 1982;57(3):341–8.
DOI: 10.3171/jns.1982.57.3.0341
53. Welch C.M., Mannarelli G., Koehler L., Telian S.A. Intraoperative auditory brainstem response results predict delayed sensorineural hearing loss after middle cranial fossa resection of vestibular schwannoma. *Otol Neurotol* 2021;42(6):e771–e8.
DOI: 10.1097/MAO.0000000000003085
54. Thirumala P.D., Carnovale G., Habeych M.E. et al. Diagnostic accuracy of brainstem auditory evoked potentials during microvascular decompression. *Neurology* 2014;83(19):1747–52.
DOI: 10.1212/WNL.0000000000000961
55. Catapano J.S., Benner D., Rhodeniser E.G. et al. Safety of brainstem safe entry zones: comparison of microsurgical outcomes associated with superficial, exophytic, and deep brainstem cavernous malformations. *J Neurosurg* 2022;139(1):113–23. DOI: 10.3171/2022.9.JNS222012
56. Kálmánchay R., Avila A., Symon L. The use of brainstem auditory evoked potentials during posterior fossa surgery as a monitor of brainstem function. *Acta Neurochir (Wien)* 1986;82(3–4):128–36.
DOI: 10.1007/BF01456373
57. Chen L., Zhao Y., Zhou L. et al. Surgical strategies in treating brainstem cavernous malformations. *Neurosurgery* 2011;68(3):609–20; discussion 620–1. DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182077531

Вклад авторов

К.Н. Лаптева: анализ данных литературы по теме статьи, написание текста статьи;
А.В. Гаврюшин: написание и научное редактирование текста статьи.

Authors' contributions

K.N. Lapteva: analysis of literature data on the topic of the article, article writing;
A.V. Gavryushin: writing and scientific editing of the article.

ORCID авторов / ORCID of authors

К.Н. Лаптева / K.N. Lapteva: <https://orcid.org/0000-0003-1163-7253>

А.В. Гаврюшин / A.V. Gavryushin: <https://orcid.org/0000-0002-8732-3114>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена без спонсорской поддержки.

Funding. The work was performed without external funding.

Статья поступила: 23.10.2024. **Принята к публикации:** 28.08.2025. **Опубликована онлайн:** 25.12.2025.

Article submitted: 23.10.2024. Accepted for publication: 28.08.2025. Published online: 25.12.2025.